

Вестник Тверского государственного технического университета, выпуск 33

УДК 621.3.08

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ И ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Я.А. Шумилова, А.В. Крупнов, Л.С. Араратьян

Защита от междувитковых коротких замыканий (КЗ) в обмотке статора – это неотъемлемая часть безопасной работы генераторов средней и большой мощности. Идеальная схема защиты против этого повреждения – разделенная по фазе поперечная дифференциальная защита. Однако особенности конструкции большинства турбогенераторов и некоторых гидрогенераторов в нейтральной точке исключают возможность установки обычных электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) на каждую фазу всех групп ветвей обмотки статора для того, чтобы осуществить разделение по фазе поперечной дифференциальной защиты. Для защиты турбогенератора от межвиткового КЗ можно установить трансформатор на-пряжения (ТН), а также продольную защиту нулевой последовательности по на-пряжению.

На гидрогенератор можно установить только один ТТ для блока поперечной дифференциальной защиты (в точке соединения между нейтральными точками двух групп трехфазных ветвей обмоток). В некоторых случаях межвитковых КЗ чувствительность и время срабатывания поперечной и продольной дифференциальной защиты, реализованной на электромагнитных ТТ, не удовлетворяют скорости срабатывания и предотвращения повреждения генератора. Необходимо искать новые решения проблемы межвитковых КЗ генераторов. Одним из таких решений могут стать ТТ малых размеров, подходящих для данной цели, например волоконно-оптический трансформатор тока (ВОТТ).

Волоконно-оптический трансформатор тока

Работа ВОТТ основана на продольном магнитооптическом эффекте Фарадея [1]. На рис. 1 представлен принцип применения эффекта Фарадея. Неполаризованный свет линейно поляризуется, затем поляризованный свет проходит через оптически неактивное вещество (оптоволокно), причем его направление поляризации регулируется магнитным полем, а угол поворота пропорционален на-пряженности (индукции) магнитного поля и длине оптоволокна, и наконец, угол поворота поляризованного света рассматривается анализатором. Анализатор используется для расчета напряженности магнитного поля и тока, который генерирует магнитное поле.

Угол поворота плоскости поляризации света [2]:

$$\beta = v \cdot B \cdot d,$$

где β – угол поворота, рад; B – плотность магнитного потока (индукция), Тл; d – длина части ячейки Фарадея, взаимодействующей с магнитным потоком, м; v – постоянная Верде, зависящая от свойств вещества ячейки, длины волны и монохромности излучения, температуры, рад/(м·Тл).

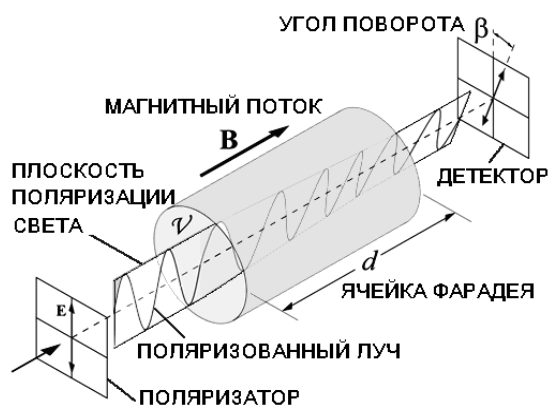


Рис. 1. Датчик магнитного поля или тока на основе эффекта Фарадея

На практике для ВОТТ применяют многovitkovую ячейку Фарадея [5], обобщенная структурная схема которого приведена на рис. 2.

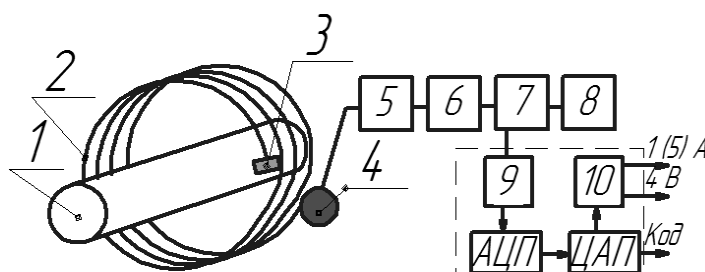


Рис. 2. Функциональная схема ВОТТ:

- 1 – электрический проводник; 2 – катушка из оптоволоконна; 3 – зеркало;
4 – четвертьволновая фазосдвигающая пластина; 5 – модулятор двулучепреломления;
6 – линейный поляризатор; 7 – оптоволоконный разветвитель; 8 – источник излучения; 9 – фотоприемник и анализатор; 10 – усилитель аналоговых сигналов

Угол поворота плоскости поляризации света при многovitkovой ячейке Фарадея можно вычислить по формуле [3, 4]:

$$\beta = v \cdot N \cdot I,$$

где v – постоянная Верде; N – число витков оптоволоконна в ячейке Фарадея; I – сила тока, А.

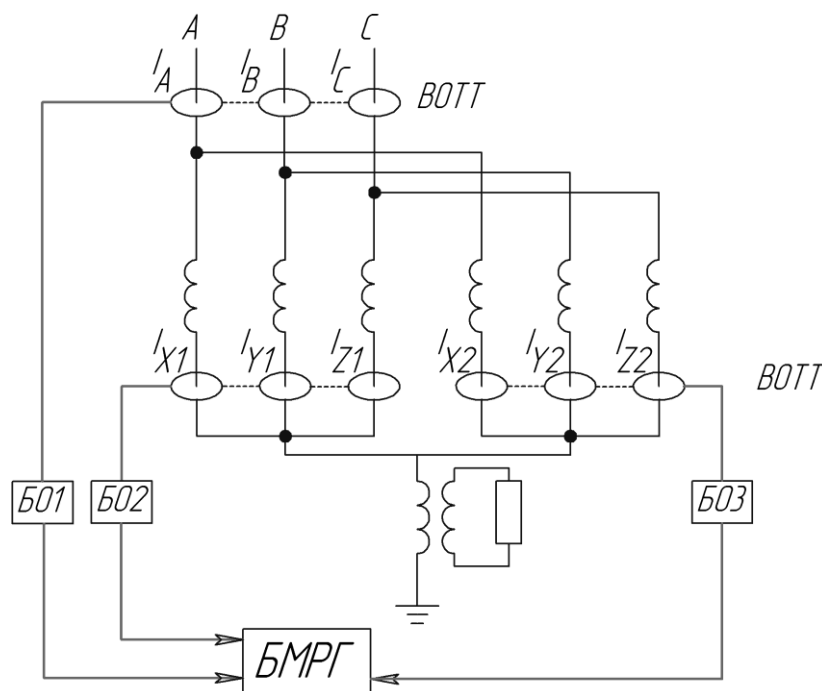
Компактность датчика ВОТТ позволит разместить его на оборудовании с ограниченным местом, что актуально для дифференциальной защиты генераторов и высоковольтных двигателей.

Схема защиты генератора на основе ВОТТ

На рис. 3 приведен генератор с двумя ветвями обмотки статора [6]. Датчик ВОТТ устанавливается на каждую ветвь фазы обмотки статора, в начале и в конце ветви. Как видно из рис. 2, датчик состоит из катушки оптоволоконна, отражателя и четвертьволновой фазосдвигающей пластины. Остальные элементы ВОТТ устанавливаются в блоке обработки, который преобразует полученный угол поворота β в цифровой и аналоговые сигналы и отправляет их на блок микропроцессорной защиты генератора по волоконно-оптическому каналу связи согласно МЭК 61850-9-2.

На основе ВОТТ можно реализовать следующие защитные функции [6]:

Применяя и комбинируя защитные функции, можно повысить эффективность и чувствительность защиты при межвитковых КЗ и обрывах цепи в обмотке статора.



БМРГ – блок микропроцессорной релейной защиты генератора

Время срабатывания фазовой дифференциальной защиты с применением ВОТТ

Когда сердечник электромагнитного ТТ насыщается, значение тока во вторичной обмотке искажается. На рис. 4а представлена осциллограмма сигнала насыщенного сердечника ТТ при установившемся режиме трехфазного КЗ, на рис. 4б показана осциллограмма при переходном процессе, вызванная апериодической составляющей тока КЗ и остаточной намагниченностью [6]. Насыщение ТТ сильно влияет на эффективность дифференциальной защиты или приводит к ее неправильной работе и эксплуатации. На практике, чтобы избежать этого последствия, насыщение сердечника учитывается в логике микропроцессорной дифференциальной защиты. Учет насыщения работает всегда, что усложняет логику и приводит к увеличению времени срабатывания дифференциальной защиты при внутренней неисправности генератора или двигателя.

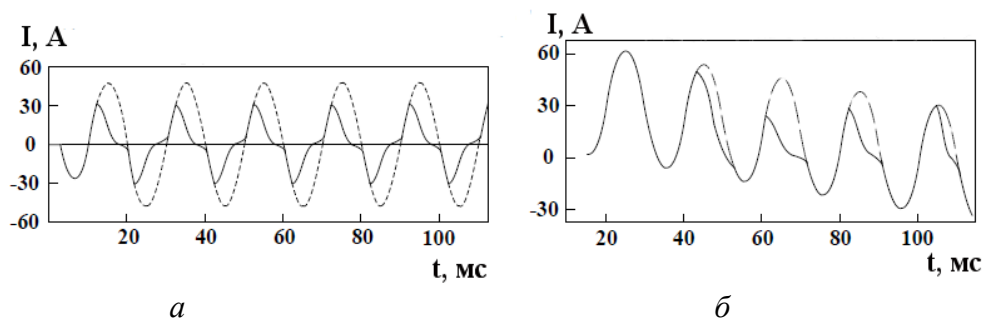


Рис. 4. Осциллограмма тока во вторичной цепи электромагнитных ТТ:
 а – установившийся режим; б – переходный режим;
 --- – сигнал от ТТ с ненасыщенным сердечником;
 — — – сигнал от ТТ с насыщенным сердечником

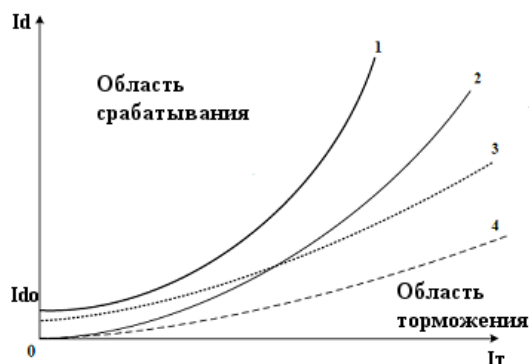
У ВОТТ проблема насыщения отсутствует, так как в нем нет ферромагнитного сердечника. Следовательно, учет насыщения ТТ в блоке дифференциальной защиты можно отключить при использовании ВОТТ, что упрощает логику действия защиты и уменьшает время срабатывания. Поскольку междуфазные повреждения обмотки статора генератора развиваются очень быстро, и сокращение времени срабатывания на несколько миллисекунд позволят существенно снизить ущерб для генератора.

Чувствительность фазовой дифференциальной защиты с применением ВОТТ

Ток нагрузки, или ток внешнего КЗ, – сквозной ток для дифференциальной защиты. Так, дифференциальный ток дисбаланса постепенно возрастает с увеличением сквозного тока, по причине факторов трансформации ТТ: относительной и угловой погрешности каждого ТТ; насыщения ТТ, вызванного апериодической составляющей или остаточной намагниченностью; несовпадения характеристик однотипных ТТ.

Для предотвращения ложного срабатывания, вызванного током небаланса, вводится тормозная характеристика (рис. 5). Ток срабатывания дифференциальной защиты отстраивается от тока небаланса, что особенно важно для генераторов, работающих при полной загрузке. Как видно из рис. 5, с ростом тока небаланса увеличивается и ток срабатывания дифференциальной защиты.

С применением ВОТТ крутизну тормозной характеристики можно уменьшить, так как влияние приведенных выше факторов снижается (насыщение и малый ток небаланса). Это повышает чувствительность дифференциальной защиты.



Электромагнитный ТТ:
 1 – кривая срабатывания;
 2 – кривая тока небаланса

ВОТТ:
 3 – кривая срабатывания;
 4 – кривая тока небаланса.
 I_d – ток срабатывания, % от $I_{ном}$;
 I_t – ток торможения, % от $I_{ном}$;
 $I_{ном}$ – номинальный ток, А

Рис. 5. Тормозная характеристика и ток небаланса дифференциальной защиты
Проблемы ТТ, связанные с частотой

При существенном снижении частоты до 5 Гц электромагнитные ТТ работают в режиме насыщения магнитопровода, что вносит серьезные искажения во вторичной цепи ТТ и влияет на функционирование дифференциальной защиты. Против нежелательного режима электромагнитных ТТ обычно принимают следующие меры:

1) временное загробление уставки срабатывания, что обеспечивает снижение чувствительности защиты;

2) временное отключение дифференциальной защиты, что приводит к снижению надежности защиты.

Работа при низкой частоте оборудования кратковременна и, как правило, происходит в момент его пуска (запуск двигателя или генератора).

По сравнению с электромагнитным ТТ ВОТТ может работать в широком спектре частот. В таблице [6] приведен пример функционирования ВОТТ при 3 и 50 Гц. Это важно, так как дифференциальной защиты при частом пуске и остановке агрегата не происходит снижения чувствительности и надежности (гидроаккумулирующие электростанции, насосные станции).

Пример показаний ВОТТ при 3 Гц и 50 Гц

Частота, Гц	Заданный ток, А	Измеренное значение ВОТТ, А
3 Гц	60,0	60,13
50 Гц	60,0	60,12

Заключение

Внедрение ВОТТ призвано повысить эффективность и чувствительность дифференциальной токовой защиты генераторов и высоковольтных двигателей. В таких трансформаторах отсутствует насыщение сердечника, вызванное апериодической составляющей тока КЗ или низкой частотой. По сравнению со стандартными электромагнитными ТТ волоконно-оптические трансформаторы обладают меньшими габаритами и могут устанавливаться в ограниченном пространстве, что позволяет установить поперечную дифференциальную защиту со стороны нейтральной точки генератора или двигателя.

Библиографический список

1. Окоси, Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси [и др.]; под ред. Т. Окоси; пер. с япон. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 256 с.
2. Гуревич, В.И. Оптоэлектронные трансформаторы: панацея или частное решение частных проблем? / В.И. Гуревич // Вести в электроэнергетике. 2010. № 2. С. 24–28.
3. Ураксеев, М.А. Принципы построения магнитооптических датчиков магнитного поля на эффекте Фарадея / М.А. Ураксеев, К.В. Соловей // Вестник УГАТУ. 2007. № 6 (26). Т. 9. С. 204–209.
4. Гавричев, В.Д. Волоконно-оптические датчики магнитного поля: учеб. пособие / В.Д. Гавричев, А.Л. Дмитриев. СПб.: СПбНИУ ИТМО, 2013. 83 с. URL: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/1318.pdf> (дата обращения: 11.10.2017).
5. Ураксеев, М.А. Оптоволоконные трансформаторы как элемент современных электротехнических комплексов и систем / М.А. Ураксеев, Т.М. Левина // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. № 2 (9). С. 23–29. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/optovolokonnye-transformatory-kak-elementy-sovremennyh-elektrotehnicheskikh-kompleksov-i-sistem> (дата обращения: 11.10.2017).
6. Chen, J. Research and Application of Digital Generator Protection Based on Fibre Optical CT / J. Chen, G. Wang, K. Wang, X. Zhao // CIGRE. 2015. P. 36–41 (S1.3-7). URL: <http://www.cigre.ru/activity/conference/relayprotect5/materials/S.1.3.pdf> (дата обращения: 11.10.2017).

